

doi: 10.11720/wtyht.2020.0135

屈利军,王庆,李波,等.综合物探方法在湖南香花岭矿田三合圩矿区深部成矿规律研究中的应用[J].物探与化探,2020,44(6):1313-1321.  
http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0135

Qu L J, Wang Q, Li B, et al. The application of multiple geophysical methods to the study of deep metallogenic regularity in the Sanhexu mining area, the Xianghualing orefield, Hunan Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(6): 1313-1321. http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0135

# 综合物探方法在湖南香花岭矿田三合圩矿区 深部成矿规律研究中的应用

屈利军,王庆,李波,姚伟

(湖南省地球物理地球化学勘查院,湖南长沙 410116)

**摘要:**通过在香花岭矿田三合圩矿区开展地面高精度磁法快速掌握了磁异常分布特征,并推测磁异常与NE向断裂带有关,再利用可控源音频大地电磁测深对磁异常进行解析,发现中深部存在连续高阻隆起异常,推断为隐伏岩体,在此基础之上对磁异常进行了半定量反演,发现磁性体呈似层状赋存于岩体外接触带且位于低阻异常带中。利用物探推断成果选择有利部位进行钻探揭露,钻孔ZK502、ZK1601和ZK3001成功验证推断的隐伏岩体并在跳马涧组砂岩中揭露了高品位锡、铅锌多金属矿。结合钻孔、物探成果和地质背景等,对本矿区成矿规律进行了综合分析研究,建立了成矿模型,并圈定了下一步找矿靶区。利用综合物探方法对深部成矿预测具有良好效果。

**关键词:**高精度磁法;可控源音频大地电磁测深;深部找矿;成矿模型

**中图分类号:** P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2020)06-1313-09

## 0 引言

湘南地区是中国有色金属之乡,矿产资源丰富,仅在香花岭地区,就发现了多个有色金属矿床,显示了该区巨大的找矿远景<sup>[1-2]</sup>。但由于具有分布散、品位变化大、矿床不连续等特征,加上开采历时悠久,浅部矿山资源已出现枯竭迹象。为解决产量不足,保证矿山正常运行,加强深、边部找矿勘查势在必行。

近年来,综合物探方法找矿已在金属矿勘探中发挥了重要作用,其中磁法在圈定金属矿成矿过程中形成的伴生矿物的磁异常具有明显效果<sup>[3-7]</sup>,CSAMT则具有勘探深度大、穿透能力强,能够发现深部断裂构造和侵入岩体,是研究深部地质构造、寻找隐伏矿的一种有效手段<sup>[7-13]</sup>。为此,在以往区域重、磁工作基础上,选择在三合圩矿区深部开展找矿工作,利用高精度磁测和可控源大地音频电磁测深对该地区深部成矿进行预测分析,基本定位了矿区

可能的成矿位置,并进行了钻探验证,取得较好的找矿效果。最后对本区成矿规律进行了综合分析研究,并圈定了下一步找矿靶区。

## 1 地质及地球物理背景

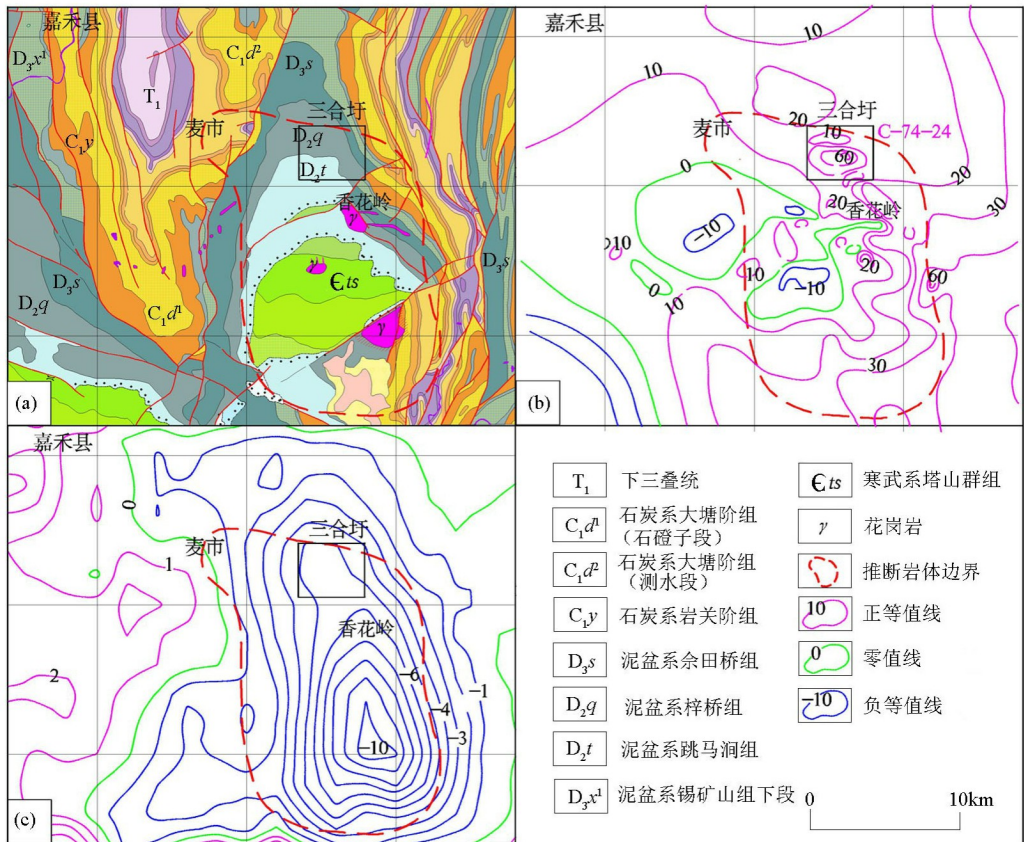
### 1.1 区域地质概况

香花岭矿田是湘南地区重要的有色金属矿产基地,位于耒阳临武SN向构造带与郴州—临武大断裂南段西侧的复合部位,区域大地构造位于扬子陆块(扬子地台)与华南板块(华南褶皱系)拼接部位<sup>[14]</sup>,构造总体上以SW向穹隆短轴背斜为主,核部由寒武系( $\epsilon$ )浅变质岩系构成(图1a),受NS向压性断层和NNE向紧闭复杂线形褶皱为辅的构造格架影响,两翼为不整合接触的中泥盆统跳马涧组( $D_2t$ )及棋梓桥组( $D_2q$ )、下泥盆统余田桥组( $D_3s$ )等地层;灰岩、白云质灰岩、砂岩、粉砂岩、石英砂岩为该区主要岩石组成。浅部有小面积岩体出露。

收稿日期:2020-03-23;修回日期:2020-07-19

基金项目:中国地质调查局“全国重要矿集区找矿预测”项目(DD2016005239)

作者简介:屈利军(1988-),男,工程师,2011年毕业于成都理工大学,主要从事地球物理勘探研究工作。Email: 516124676@qq.com



a—区域地质;b—航磁  $\Delta T$  等值线平面 (nT);c—剩余重力异常 (mGal)

a—geological map of area;b—aeromagnetic survey  $\Delta T$  contour plan(nT);c—residual gravity anomaly map(mGal)

图 1 勘查区区域地质及地球物理背景

Fig.1 Regional geological and geophysical background of the exploration area

1.2 区域地球物理背景

据区域重、磁资料(图 1b、c)显示香花岭短轴背斜核部存在一圈闭重力剩余低异常,前人认为香花岭矿田存在 NW 向深部基底断裂和浅部岩浆岩穹窿莲花状旋卷构造,推断隐伏花岗岩面积为 280 m<sup>2</sup>,平均深度 1.5 km,各岩体在地表下部连成一片,构成半隐伏大岩基<sup>[15]</sup>。航磁工作发现三合圩矿区内存在 C-74-24 低缓异常,呈近 EW 走向、椭圆状特征。

1.3 矿区地质背景

三合圩锡多金属矿区地处香花岭矿田北部边缘,香花岭短轴背斜的北倾伏端。矿区内主要地层为中泥盆统跳马涧组,次为棋梓桥组及第四系。棋梓桥组(D<sub>2</sub>q)是主要含铅锌矿地层,主要岩性为灰岩、白云岩;跳马涧组(D<sub>2</sub>t)为区内锡矿的主要赋矿地层,工作区内仅出露有中段,中段(D<sub>2</sub>t<sup>2</sup>)分为两层,第二层(D<sub>2</sub>t<sup>2-2</sup>):为杂色砂岩、泥质粉砂岩夹页岩层;第一层(D<sub>2</sub>t<sup>2-1</sup>):灰白色石英砂岩与紫红色砂岩互层。区内地层自西向东倾向由 NNW 转为 NE 向,基本为一弧形单斜构造,地层倾角一般 10°~15°。区内与成矿关系密切的主要为 NE 向和 NW 向断

裂。跳马涧组部分岩石经受了程度不同的热变质,主要为硅化,其次有黄铁矿化、绿泥石化、绢云母化。

1.4 测区岩石物性特征

对矿区泥盆系中统棋梓桥组和跳马涧组两套地层中的不同岩矿石标本进行了磁性和电性参数统计(表 1)。结果表明:赤铁矿化变质砂岩、磁黄铁矿化石英角岩、变质石英粉砂岩为中等磁性,黄铁矿化泥灰岩、磁黄铁矿化铅锌矿、石英角岩均属弱磁性,而正常沉积岩为无磁性或极弱磁性;灰岩、白云岩电阻率较高,其次为变质砂岩,矿(化)体电阻率最低;花岗岩电阻率一般较高但磁性极弱<sup>[2]</sup>。以上各类岩矿石具有明显的物性差异,具备地球物理勘探前提。

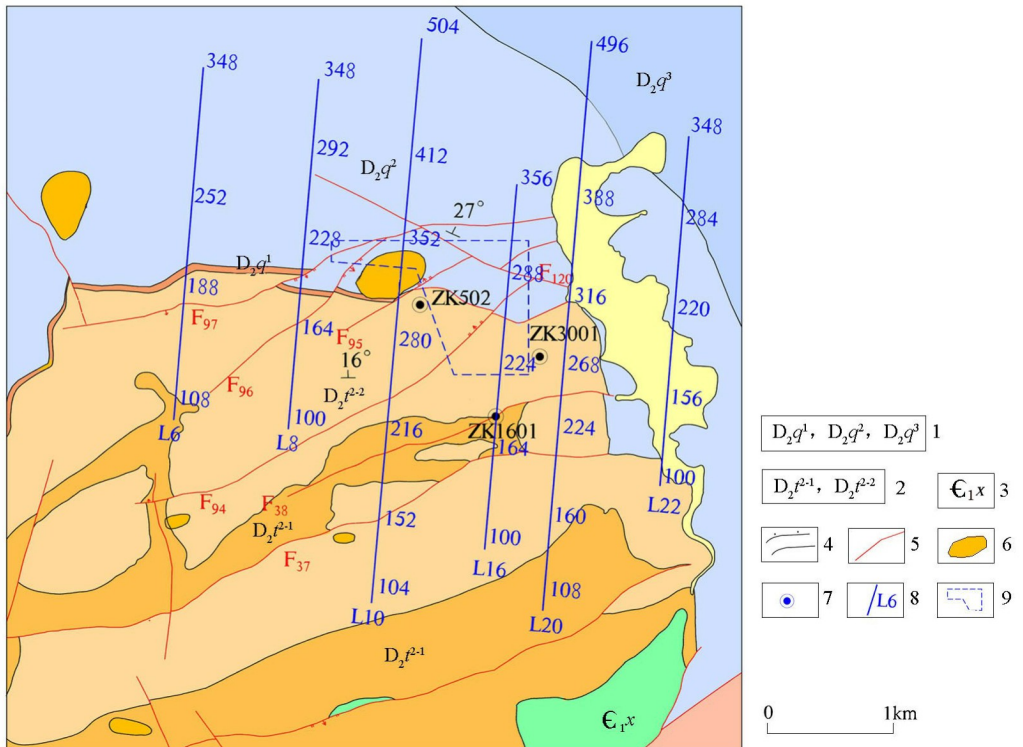
2 工作布设及技术参数

以垂直地层走向,布设 6 条综合物探剖面(图 2),线距 300~600 m,点距 40 m。使用加拿大 GEM 公司 GSM-19T 标准磁力仪,开工前、后对仪器进行了一致性测定,统计精度为 0.94、0.67nT,噪声误差

表 1 工区不同岩石物性参数统计

Table 1 Statistical table of physical characteristics in the area

地层代号	岩矿石名称	$K$ 平均值/ ( $10^{-6}$ CGSM)	$J_r$ 平均值/ ( $10^{-6}$ CGSM)	电阻率平均值/ ( $\Omega \cdot m$ )
$D_2q$	灰岩	0	0	12023
	白云岩	0	0	10233
	铅锌矿化白云岩	0	0	2291
	黄铁矿化泥灰岩	646	2570	2754
	磁黄铁矿化铅锌矿	415	2643	457
$D_2t$	赤磁铁矿石	57544	87096	55
	赤-磁铁矿化变质粉砂岩	3945	2891	5152
	磁黄铁矿化变质石英粉砂岩	2188	8318	7104
	变质石英粉砂岩	1076	3954	6966
	磁黄铁矿化石英角岩	1278	3440	2793
	石英角岩	830	2138	5916



1—泥盆系棋梓桥组灰岩、白云岩、白云质灰岩;2—泥盆系跳马涧组二段石英砂岩、泥质粉砂岩;3—寒武系砂岩;4—地质界线;5—断裂;6—铁锰帽;7—钻孔位置;8—物探剖面;9—采矿权范围

1—limestone, dolomite and dolomitic limestone of Devonian Qiziqiao Formation; 2—quartz sandstone and argillaceous siltstone of the second member of Devonian Tiaomajian Formation; 3—Cambrian sandstone; 4—geological boundary; 5—fault zone; 6—iron-manganese cap; 7—drilling location; 8—geophysical prospecting profile; 9—mining rights scope

图 2 勘查区地质情况及物探剖面布设

Fig.2 Geological conditions and geophysical profile settings in the exploration area

小于 0.5 nT, 本身精度小于 1 nT。采取“一同三不同”方式进行实地检查, 质检率为 8.45%, 统计精度为  $\pm 3.21$  nT, 满足要求。工区东部属河流下游, 矿渣堆积造成较大干扰, 其余地段无明显干扰。对测量数据进行总基点改正、日变改正、高度改正、梯度改正, 得到总磁化强度  $\Delta T$ 。半定量剖面反演以地磁场方向  $36.85^\circ$  作为磁化方向, 磁性体有效磁化强度用

特征三角形及切线法解释取得的平均参数  $J_s = 141.0 \times 10^{-6}$  CGSM。

CSAMT 数据采集使用美国 Zonge 公司生产的 GDP32-II 型多功能电法工作站, 采用偶极装置进行标量测量方式, 供电极距  $AB = 1340$  km, 收发距  $r = 16$  km, 测量极距  $MN = 40$  m, 测量点距 40 m; 数据采集频段从 1~8 192 Hz; 每个排列采用 1 个磁道带 4

个电道;测点观测在场源 AB 的垂直平分线两侧 15° 角扇形范围内进行,供电电流 16 A。对数据做了预处理,包括剔除畸变点、数据圆滑和静态校正,使用 zonge 公司 SCS-2D 程序进行了二维反演。区内电磁干扰较弱,采用不同操作员和不同时间段对数据有突变、可疑的地段做了全面检查,质检率 5.2%,统计结果:视电阻率均方误差为 4.9%,相位均方误差为 7%。

### 3 高精度磁测成果

图 3 为勘查区高精度磁测  $\Delta T$  平面等值线, $\Delta T$  变化范围一般在 -53~114 nT 之间,往 S 向、N 向有减弱的趋势,圈定了 C1、C2 和 C3 磁异常带。其中

C1 为正负相伴磁异常,零值线通过 10 线 368 点向西经过 20 线 370 点,成为本区南正北负异常的分界线,中心梯度带坐落在跳马涧组与棋梓桥组地层的接触带上,整体具有 NE 向展布的特征,结合地表铁帽及  $F_{95}$ 、 $F_{120}$  等断裂特征,推测异常与 NE 向、NW 向断裂带密切相关。C2 异常较 C1 更弱,宽度更窄,位于跳马涧组地层中,同样具有 NE 向展布特征,推测存在 NE 向断裂。C3 异常是由河流中沉积的矿渣引起。从前面叙述的地质、地球物理特征中可知,跳马涧组蚀变带中磁铁矿、磁黄铁矿、赤磁铁矿化变质砂岩、磁黄铁矿化变质石英砂岩都具有中等磁性,这些岩石是引起地表磁场的主要场源,而锡矿石又沿上述岩石的石英粒之间隙生长,认为磁异常与锡多金属矿有密切关系。

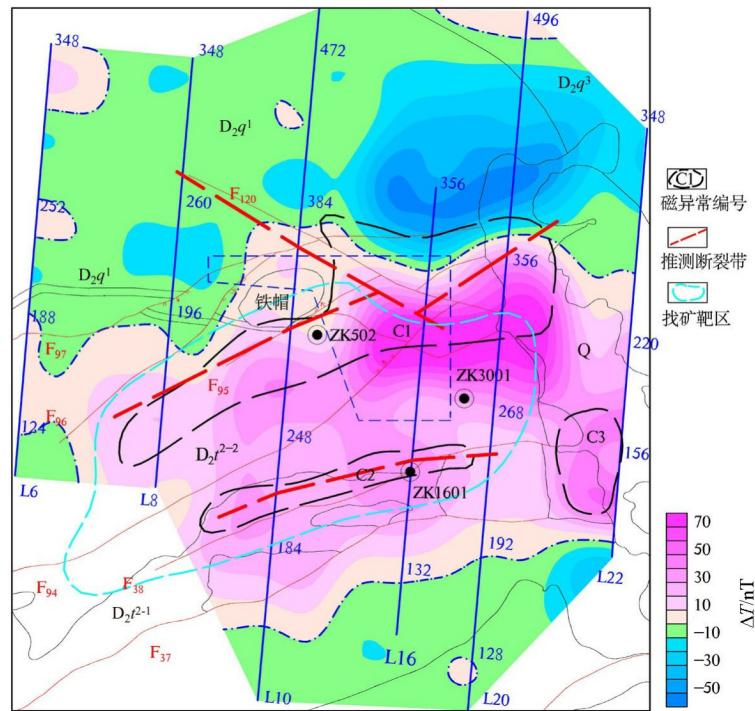


图 3 勘查区高精度磁法推断成果

Fig.3 High-precision magnetic method speculation results in the exploration area

### 4 可控源音频大地电磁测量成果

通过磁异常分布特征分析认为区内存在与断裂构造紧密相关的磁性蚀变带,因此选择 10、16、20 线进一步开展可控源音频大地电磁测深工作。整体测量结果如下(图 4~6):0~40 m 埋深为一层不连续低阻带(平均  $\rho_s \approx 300 \Omega \cdot m$ ),该层为泥盆系中统棋梓桥组( $D_2q$ )、跳马涧组( $D_2t$ )组的强风化层和第四系覆盖层组成,覆盖层厚度不均是造成水平低阻不

连续的主要原因。40~350 m 埋深段为一层中等视电阻率层(平均  $\rho_s \approx 1600 \Omega \cdot m$ ),推断对应为泥盆系中统棋梓桥组( $D_2q$ )灰岩、跳马涧组( $D_2t$ )组弱变质砂岩。350~470 m 埋深为一层极低阻异常带(平均  $\rho_s \approx 100 \Omega \cdot m$ ),推断与矿(化)体有关。470~850 m 范围内为“株状”高一极高电阻率区域(平均  $\rho_s \approx 3000 \Omega \cdot m$ ),其分布具有一定规模,更深处有连成一体趋势,推测为隐伏的花岗岩岩体。另外局部电阻率横向不连续,具有“V”型特征,并结合磁异常位置,推测区内存在 3 条主要的控矿断裂构造,其

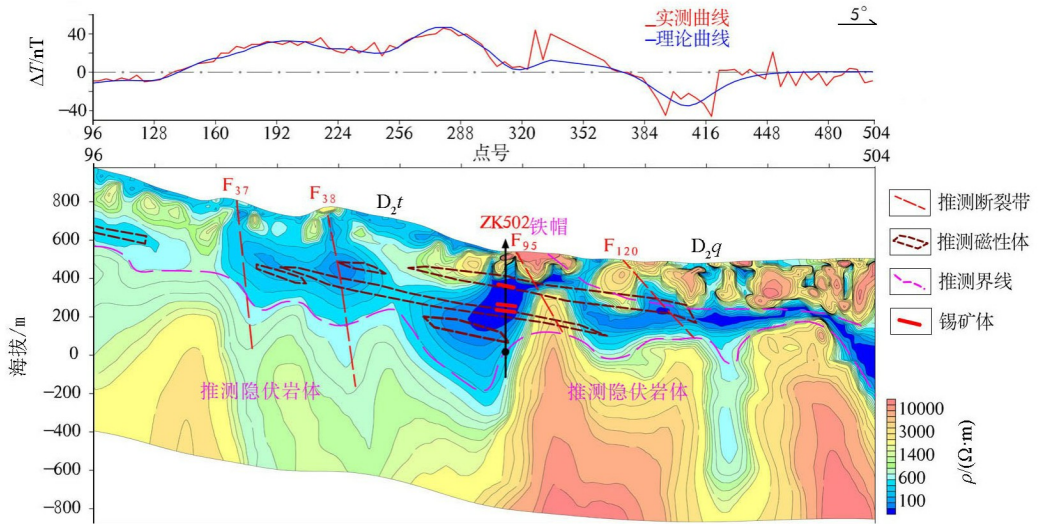


图 4 10 线综合物探推断成果

Fig.4 Comprehensive geophysical interpretation map of line-10 profile

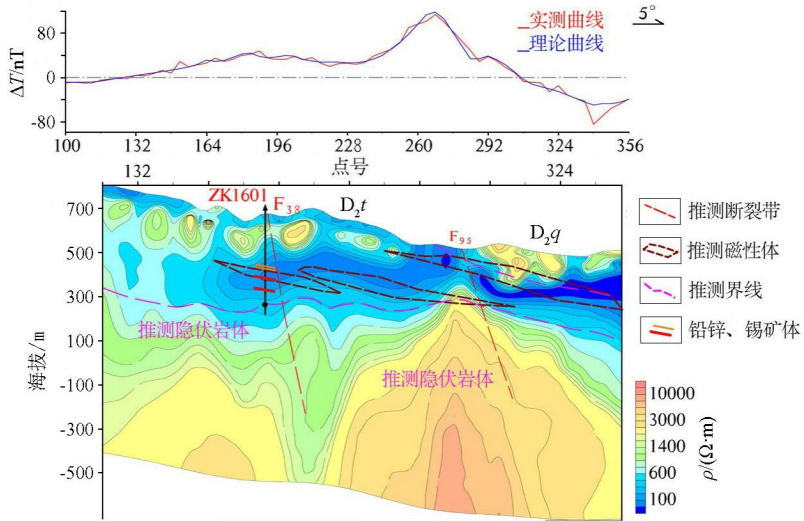


图 5 16 线综合物探推断成果

Fig.5 Comprehensive geophysical interpretation map of line-16 profile

走向为 NE 向、NW 向(图 3)。

以上电性结构特征反映出了地层及隐伏岩体、断裂带在深部的分布情况,在此基础之上通过对磁异常进行半定量反演,推测在棋梓桥底部灰岩与跳马涧砂岩过渡层中存在磁性体,在花岗岩岩体与上覆跳马涧组(D<sub>2</sub>t)组之间的极低阻异常空间范围内存在磁性体,磁性体呈似层状,与地层倾向、岩体侵入界面较为一致,且基本位于推测断裂带附近,认为接触带和断裂带附近蚀变强烈,存在矿化蚀变的可能。综上认为,隐伏岩体及断层周围的矿化蚀变带在地表引起了一定程度的低缓磁异常,位于极低阻异常带范围内且和推测的似层状磁性体重叠空间范围是本区有利的赋矿部位。

万方数据

### 5 钻探验证情况

基于以上物探推断成果,在推测 F<sub>38</sub>、F<sub>95</sub> 断裂带附近开展钻探验证工作。其中 ZK3001(图 7):终孔深度 510.52 m,在 461.5 m 揭露到隐伏花岗岩,并在埋深 297.51~302.51 m 的泥盆系中统跳马涧组石英砂岩的层间破碎带中,发现了厚度 4.66 m 的似层状、透镜状 I 号矿体,呈浸染团块状分布,矿体平均品位 Zn 1.19%、Sn 0.223%。II 号矿体赋存深度 339.99~344.35 m 之间,真厚度 2.93 m,矿体倾角 47°,赋存于断裂带中,形状为似层状、透镜状产出。主要有用组分为 Sn,其平均含量为 0.505%。

ZK1601:终孔深度456.89m,于孔深405.85 m

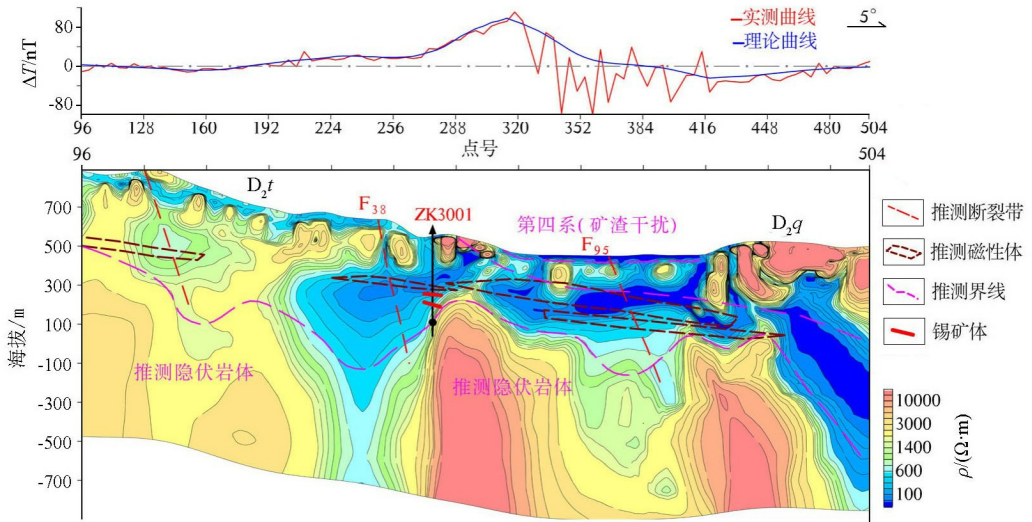


图 6 20 线综合物探推断成果

Fig.6 Comprehensive geophysical interpretation map of line-20 profile

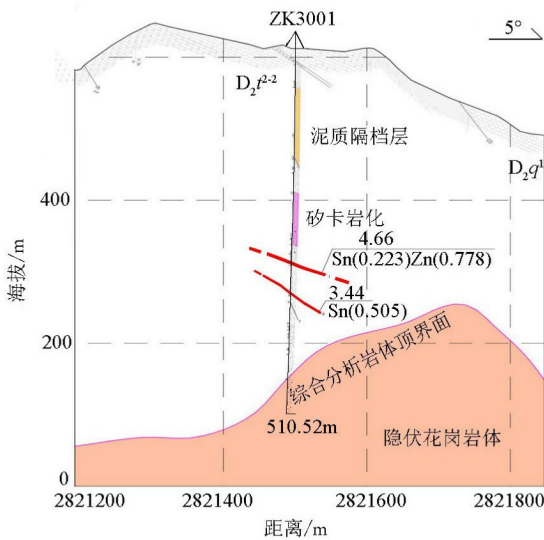


图 7 ZK3001 钻孔地质剖面

Fig.7 Geological section of ZK3001 borehole

处揭露岩体,该孔揭露工业矿体 4 个,分别为 I 号铅锌、锡矿体埋深 236.65.8 ~ 238.74 m, Zn 平均品位 1.63%, Sn 平均品位 0.079%; II 号铅锌、锡矿体埋深 245.76 ~ 250.01 m, Zn 平均品位 1.786%, Sn 平均品位 0.117%; III 号锡、铅锌矿体埋深 290.87 ~ 292.53 m, Sn 平均品位 0.521%, Zn 平均品位 0.528%; IV 号锡、铅锌矿体埋深 343.63 ~ 346.68 m, Sn 平均品位 0.246%, Zn 平均品位 0.692%。矿石以锡石、(铁)闪锌矿、磁黄铁矿为主,呈浸染团块状分布。

ZK502:终孔深度 652.08 m,于孔深 521 m 处揭露岩体,在孔深 185.17 ~ 186.37 m,见 I 号工业锡多金属矿,Sn 平均品位 0.298%,Zn 平均品位 0.25%; II 号矿体赋存深度 270.2 ~ 271.4 m, Sn 平均品位

0.365%,Zn 平均品位 0.02%。III 号矿(化)体赋存深度 295.78 ~ 307.14 m, Sn 平均品位 0.116%。

通过施工以上 3 个钻探,成功验证了物探推断的隐伏岩体并在跳马涧组砂岩中揭露了高品位锡铅锌多金属矿。并通过数据统计,初步了解了矿体与地层、岩体的空间位置关系(图 8)。

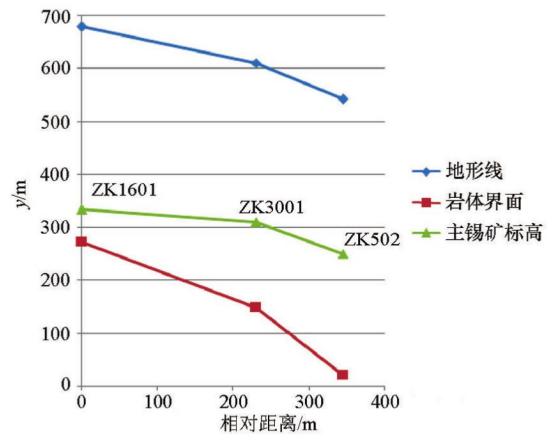


图 8 矿体与地层、岩体的空间位置关系

Fig.8 The spatial position relation diagram of ore body, stratum and rock body

## 6 成矿规律研究认识

结合以上钻探揭露情况,进一步研究物探成果和地质资料,综合认为本区锡铅锌多金属矿床属岩浆气化—高中温热液充填交代矿床,多源多成因,受燕山期花岗岩体、砂岩、岩体内接触带以及处于岩体热力蚀变范围内的断裂构造带、裂隙构造、层间薄弱面等多重控制。推测其成矿模型如图 9 所示,由里向外构成是:① 花岗岩,即含矿母岩和成矿物质

来源;② 岩体顶部形成的岩浆晚期钾化、云英岩化;③ 为黄铁矿化、透闪石化等蚀变有关的蚀变砂岩型锡多金属;④ 绿泥石化、黄铁矿化有关的铅锌硫化物矿床;⑤ 碳酸盐岩(或砂岩)弱铅锌矿化;⑥ 在岩体顶部断裂中或次一级断层中形成含磁铁矿、磁黄铁矿的锡铅锌矿体。

对本区成矿规律特征研究总结如下:

1) 矿床上方具有明显的局部重力负异常。

2) 矿体上方具有明显的低缓正磁异常,  $\Delta T$  磁异常呈 NE 向展布, 往 SW 方向等值线未封闭, 有延伸的趋势, 具有下一步找矿潜力。矿床的强围岩蚀变带与磁异常带峰值区对应, 外侧弱蚀变体为叠加的次级异常。

3) 矿体赋存于岩体上方的层状低阻异常带中, 通过 CSAMT 法能准确识别出强烈蚀变部位, 但对局部次级断裂带反映不够明显。

4) 矿床以岩体为中心, 呈水平和垂直带状分

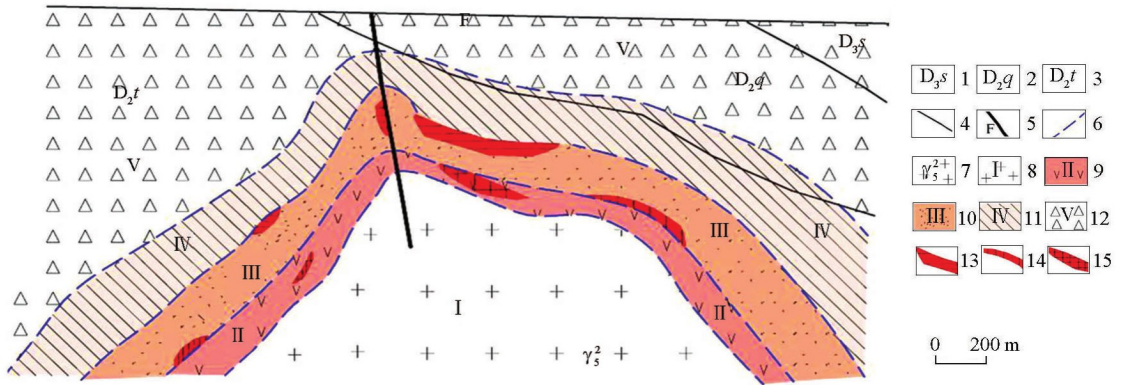
布, 近岩体处以锡为主, 远离岩体以铅锌为主。

5) 在棋梓桥组底部白云岩中虽存在磁性蚀变带, 但物探成果显示该部位距离岩体太近, 平均约 120 m, 温度过高, 因此认为不具有寻找工业铅锌矿体的前景。

6) 本次钻孔在锡矿层上部揭露含泥质砂岩层, 含泥质砂岩层距离锡矿层 150~190 m, 含矿热液沿断裂构造侵位, 运移至含泥质含量较高的碎屑岩类受到隔挡, 因而在含泥质砂岩层下方的钙质岩层发生一定规模砂卡岩化, 富集形成锡矿层, 同时在含泥质砂岩层与锡矿层之间形成 1~3 层铅锌矿体。

7) 层控与构造因素是主导因素, 规模极大的隐伏岩体是主要成矿物质来源, 岩体与锡多金属矿体空间距离一般 60~220 m, 在推测断裂带附近寻找热液填充型锡多金属矿具有较大潜力。

通过总结以上成矿规律, 圈定了下一步找矿有利靶区(图 3)。



1—泥盆系余田桥组;2—泥盆系棋梓桥组;3—泥盆系跳马涧组;4—地质界线;5—断层;6—矿化界线;7—花岗岩;8—云英岩化、钾化 Nb、Y 带;9—云英岩化、硫化 W、Sn 带;10—透闪石化、绿泥石化 Sn、Pb、Zn 带;11—黄铁矿化、碳酸盐化 Pb、Zn 带;12—碳酸盐化 F、Hg 带;13—Pb、Zn 矿体;14—Sn、Pb、Zn 矿体;15—W、Sn 矿体

1—Devonian Shetianqiao Formation; 2—Devonian Qiziqiao Formation; 3—Devonian Tiaomajian Formation; 4—geological boundary; 5—fault zone; 6—mineralization boundary; 7—granite; 8—greisenization and potassium Nb, Y zone; 9—greisenization and vulcanized W, Sn zone; 10—tremolite and chloritization Sn, Pb, Zn zone; 11—pyritization and carbonic acid Salinized Pb, Zn zone; 12—carbonic acid Salinized F, Hg zone; 13—Pb, Zn ore body; 14—Sn, Pb, Zn ore body; 15—W, Sn ore body

图 9 成矿预测模型

Fig.9 Metallogenic prediction model diagram

### 7 结论

1) 通过分析区域重、磁资料及地质背景, 锁定了三合圩找矿靶区, 再利用高精度磁法快速了解了地面磁异常特征, 推测区内存在磁性蚀变带且与 NE 向断裂带紧密相关。

2) 通过 CSAMT 工作, 发现中深部存在隐伏岩体, 推断了地层及隐伏岩体、断裂带在深部的分布情况, 在此基础之上对磁异常进行半定量反演, 推断了

磁性体的分布形态、大小、规模, 发现磁性体主要位于极低阻异常带中, 推测该部位矿化蚀变强烈, 是有利赋矿部位。

3) 通过布置 ZK502、ZK1601、ZK3001, 成功验证了推断的隐伏岩体并在跳马涧组砂岩中揭露了高品位锡铅锌多金属矿, 证实了推断的正确性, 明确了磁异常的地质原因, 系由赤磁铁矿及赤磁铁矿化变质砂岩、粉砂岩和磁黄铁矿化铅锌矿引起。磁性矿物与锡多金属矿共生, 出现在锡多金属矿的顶底板接触带, 并相应表现为低阻异常。

4) 通过综合研究钻探、物探成果和地质资料,进一步分析了本区锡多金属矿成矿规律,建立了成矿模型,得出了矿(化)体的形成和形态不仅受岩体内外接触带控制,也同样受与接触带套合的断裂构造、裂隙构造、层间薄弱面控制的结论,并基本摸清了矿(化)体与地层、断裂、岩体侵入之间的空间位置关系。研究隐伏花岗岩顶上带的综合地质模式对本次深部找矿具有重要意义。

5) 应用高精度磁法和 CSAMT 在本区寻找锡多金属矿是切实高效的方法,为下一步地质找矿工作指明了方向,也为其他类似地区找矿提供了经验。

**参考文献 (References):**

[1] 钟江临.湖南香花岭地区有色、稀有多金属矿床主要类型及找矿方向[J].华南地质与矿产,2014,30(2):99-108.  
Zhong J L.Major types and prospecting direction of nonferrous and rare polymetallic ore deposit in Xianghualing area, south China [J].Geology and Mineral Resources of South China,2014,30(2):99-108.

[2] 陈炳贵,鞠述晔,赵银光,等.香花岭矿田综合信息找矿模型研究与应用[J].地球物理学进展,2013,28(6):3254-3269.  
Chen B G,Ju S Y,Zhao Y G, et al.Study and application of searching mineral model by integrative information for Xanghualing mineral deposit [J].Progress in Geophysics,2013,28(6):3254-3269.

[3] 吴卫国.综合物化探方法在粤北一六多金属矿区中的应用[J].物探与化探,2015,39(6):1097-1103.  
Wu W G.The application of the integrated geophysical-geochemical method to the Yiliu polymetallic ore district in northern Guangdong Province[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2015,39(6):1097-1103.

[4] 孟贵祥.小热泉子铜矿区物探找矿效果及综合找矿模式[J].物探与化探,2002,26(1):32-38.  
Meng G X.The effects of geophysical exploration in the xiaorequanzi copper ore district and an integrated prospecting model[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2002,26(1):32-38.

[5] 黄宁,陈国光,张景,等.综合物探方法在多金属找矿靶区预测中的应用[J].物探与化探,2016,40(5):929-934.  
Huang N,Chen G G,Zhang J, et al.Application and Study of comprehensive geophysical methods in prospecting target of iron and copper polymetallic ore[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2016,40(5):929-934.

[6] 陆桂福,米宏泽,刘瑞德,等.综合物探在斑岩型银钼多金属矿勘查中的应用[J].物探与化探,2014,38(4):835-839.  
Lu G F,Mi H Z,Liu R D, et al.The application of integrated geophysical exploration technology to the prospecting for porphyry silver-molybdenum polymetallic deposits[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2014,38(4):835-839.

[7] 吴晓峰,曹彦荣,韩红庆.矿山深部、边部磁法找矿工作方法和步骤[J].物探与化探,2013,37(2):233-236.  
Wu X C, Cao Y R, Han H Q.Methods and steps of work for magnet-

ic geological exploration in the depth and on the edge of the old mine[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2013,37(2):233-236.

[8] 王峰,吴志春,陈凯,等.CSAMT法在深部地质结构探测中的应用——以相山铀矿田邹家山地区为例[J].物探与化探,2016,40(1):17-20.  
Wang F,Wu Z C,Chen K, et al.The application of CSAMT to detecting deep geological structures in the Zoujiashan area of the Xiangshan uranium orefield[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2016,40(1):17-20.

[9] 王志宏,全旭东,王利民,等.综合物探测量在桃山地区铀矿勘查中的应用[J].物探与化探,2014,38(1):35-40.  
Wang Z H,Quan X D,Wang L M, et al.The application of integrated geophysical survey to the exploration of uranium deposits in Taoshan area[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2014,38(1):35-40.

[10] 林方丽,王光杰,杨晓勇.综合电磁法在矿区深部成矿机制中的应用研究——以皖南乌溪多金属矿区为例[J].地球物理学报,2016,59(11):4323-4337.  
Lin F L,Wang G J,Yang X Y.Application of comprehensive electromagnetic study in deep mineralization mechanism A case study of the WUXI polymetallic ore deposit, south Anhui [J].Chinese Journal of Geophysics,2016,59(11):4323-4337.

[11] 邹旭,解国爱,张庆龙,等.可控源音频大地电磁法在安庆铜矿乌珠尖探区深部找矿中的应用[J].世界地质,2016,35(2):526-535.  
Zhou X,Xie A G,Zhang Q L, et al.Application of CSAMT in deep exploration of Wuzhujian exploration area in Anqing copper deposit [J].Global Geology,2016,35(2):526-535.

[12] 李忠平.应用综合物探方法探测新疆萨尔苏克外围及深部金铜矿床[J].物探与化探,2014,38(3):418-422.  
Li Z P.The application of integrated geophysical methods to the prospecting for gold-copper deposits on the periphery and in the depth of Sarsuk area, Xinjiang [J].Geophysical and Geochemical Exploration,2014,38(3):418-422.

[13] 屈利军,李波,胡绪云.综合电法在南岭魏家钨矿深部勘查中的应用[J].工程地球物理学报,2015,12(2):183-189.  
Qu L J,Li B,Hu X Y.The application of Multiple electric methods to the prospecting for tungsten ore in the depth of Weijia South Ridge[J].Chinese Journal of Engineering Geophysics,2015,12(2):183-189.

[14] 罗卫,李文光,周涛,等.湘南香花岭锡多金属矿田地质地球化学特征及成因探讨[J].地质调查与研究,2010,33(1):2-11.  
Luo W,Li W G,Zhou T, et al.Discussion on the Genesis and Geological-geochemical Characteristics of the Xianghualing Tin-polymetallic orefield in the south of Hunan province [J].Geological Survey and Research,2010,33(1):2-11.

[15] 刘生,袁奎荣.湖南香花岭隐伏花岗岩顶上带综合地质模式[J].桂林冶金地质学院学报,1992,12(3):309-317.  
Liu S,Yuan K R.The study on synthetical geological model for the top belt of Xianghualing,hidden granite,Hunan[J].Journal of Guilin College of Geology,1992,12(3):309-317.



## The application of multiple geophysical methods to the study of deep metallogenic regularity in the Sanhexu mining area, the Xianghualing orefield, Hunan Province

QU Li-Jun, WANG Qing, LI Bo, YAO Wei

(*Geophysical and Geochemical Institute of Hunan Province, Changsha 410116, China*)

**Abstract:** In this study, the surface anomaly distribution characteristics were quickly grasped by performing high-precision magnetic methods on the ground in the Sanhexu mining area of the Xianghualing orefield. Preliminary prediction anomalies are mainly caused by northeastward fault zones. The magnetic anomalies were analyzed by using CSAMT, and a continuous high-resistance uplift was found in the middle and deep parts. The anomaly is inferred to be granite. On such a basis, the authors began inversion of the magnetic anomaly, and it is found that the magnetic object is layered at the edge of the granite and is located in a low-resistance anomaly zone. According to the results of geophysical inference, the favorable metallogenic sites were selected for drilling and exposure. The boreholes ZK502, ZK1601, and ZK3001 successfully verified the inferred granite and revealed high level tin-lead-zinc polymetallic orebody in the sandstone of the Tiaomajian stratum. Based on the results of drilling, geophysical prospecting, and geological background, the authors carried out a comprehensive analysis and study of the metallogenic regularity of the mining area, established a metallogenic model, and delineated the next target for ore prospecting. The above two geophysical methods have good effects on the prediction of deep mineralization.

**Key words:** high precision magnetic method; CSAMT; deep prospecting; metallogenic model

(本文编辑:王萌)

上接 1312 页

## The application of EM clustering method to the determination of stream sediment geochemical anomalies in areas with variable lithologies

SUN Yao-Yao, HAO Li-Bo, ZHAO Xin-Yun, LU Ji-Long, MA Cheng-You, WEI Qiao-Qiao

(*College of Geo-Exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China*)

**Abstract:** The separation of anomalies from backgrounds is a critical step in geochemical prospecting. However, the determination of stream sediment geochemical anomalies is always affected by lithologic backgrounds in areas with variable lithologies. If this influence is not eliminated prior to anomaly determination, some serious errors may occur. In fact, a problem of lithologic background is essentially a problem of multiple population, which can be effectively solved by the clustering method based on the Expectation-Maximization (EM) algorithm. In this study, the authors applied the EM clustering method to a geochemical data set from a 1 : 200,000 scale stream sediment survey, and then discussed the influence of separating multiple populations on anomaly determination. A practical example demonstrates that geochemical anomalies of stream sediments in lithologically complex regions can be determined in a more reasonable way by using the EM clustering method. This is mainly reflected in two aspects: on the one hand, strong but false anomalies can be eliminated, and on the other hand, weak but important anomalies can be uncovered.

**Key words:** geochemical anomaly; lithology background; multiple population; EM algorithm; stream sediments

(本文编辑:蒋实)